

ENSAIOS DE COMPRESSÃO EM PRISMAS DE BLOCOS DE CONCRETO À COMPRESSÃO- DEFORMABILIDADE E MODO DE RUPTURA

Gihad Mohamad¹, Paulo B. Lourenço², Humberto R. Roman³

¹ PhD Student of Civil Engineering department of Minho University, CAPES-MEC-UNIVALI-UNESC, Azurém- Postal Code: 4800-058, Guimarães-Portugal.

² Associate Professor- Civil Engineering department of Minho University - Azurém- Postal Code: 4800-058, Guimarães-Portugal.

³ Professor- Civil Engineering department of Federal University of Santa Catarina, Postal Code: 88049-900, Florianópolis-Brazil.

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é analisar os ensaios de compressão em prismas confeccionados com diferentes blocos de concreto e argamassas, propondo um modelo que estabeleça a relação entre o modo de ruptura e as características mecânicas dos materiais isolados. A dificuldade em empreender testes experimentais faz com que generalizações sejam adotadas a partir de parâmetros não aplicáveis aos diversos tipos de composições. Com isso, propõem-se um modelo em função da rigidez dos componentes, com intuito de iniciar uma discussão sobre as características de deformabilidade linear, não-linear e de ruptura do conjunto. As conclusões obtidas são: as não-linearidades da curva tensão-deformação do conjunto dependem da argamassa utilizada; o aumento na rigidez da argamassa de assentamento depende da resistência à compressão uniaxial; o ensaio de tração indireta por compressão forneceu resultados com boa precisão e baixa variabilidade; houve um aumento significativo no Poisson dos prismas, medido no bloco, após a relação entre a tensão atuante e a resistência última atingir o nível de 0.6; salienta-se a existência de dois modos de ruptura, o primeiro é caracterizado pela indução de tração no bloco até atingir o limite de resistência à tração e o segundo é caracterizado pelo esmagamento da junta de assentamento, quando a argamassa atingir o limite da resistência à compressão confinada.

1. INTRODUÇÃO

A alvenaria estrutural é um dos sistemas construtivos comumente empregado em países como o Brasil, devido a facilidade de execução e economia proporcionado. Estas vantagens tornam, este tipo de construção, mais competitiva em relação aos demais.

A principal característica da alvenaria é ter a parede como elemento resistente as cargas verticais e laterais, onde a associação intercalada entre a unidade e a junta de assentamento é denominada por prisma. A norma brasileira NBR-10837 designa o prisma como principal parâmetro de especificação e controle dos materiais empregados.

A figura 1 mostra um prédio de 4 pavimentos executados em alvenaria estrutural de blocos de concreto.



Figura 1- Prédio em alvenaria estrutural de blocos de concreto (Fonte: <http://www.nepae.feis.unesp.br/>).

O mecanismo indutor de ruptura na alvenaria e a influência da resistência do bloco e argamassa no conjunto são parâmetros fundamentais para estimar a capacidade resistente do elemento. Todavia, estabelecer equações, a partir de resultados mecânicos dos materiais sob estados de tensão não equivalente ao presente no conjunto, de certa forma, já induzem erro ao serem aplicados como modelos genéricos, devido às distintas situações, tais como: características da mão-de-obra, tipo de unidade (equipamento de fabricação) e traço de argamassa. Portanto, o conhecimento das características mecânicas dos materiais isolados e da interação entre os mesmos pode permitir uma melhor compreensão dos fatores envolvidos na deformabilidade e ruptura do conjunto e, por consequência, maximizar a capacidade resistente do sistema.

Este trabalho pretende analisar os resultados mecânicos de prismas associando o modo de ruptura, em função da proporção de rigidez entre materiais (bloco e argamassa), bem como iniciar uma discussão nas características de deformabilidade linear e não-linear do conjunto.

2. CARACTERIZAÇÃO À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS.

O valor do módulo de elasticidade tangente inicial e resistência à compressão das argamassas foram determinados, a partir de ensaios em cilindros com 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura (Figura 2). Um total de seis amostras foi testado, para cada traço de argamassa. Os resultados apresentados são as médias de valores dos deslocamentos obtidos em dois pontos afastados um do outro de 180 graus. O módulo de elasticidade tangente inicial foi determinado a um nível de tensão de 30% da resistência última do material.

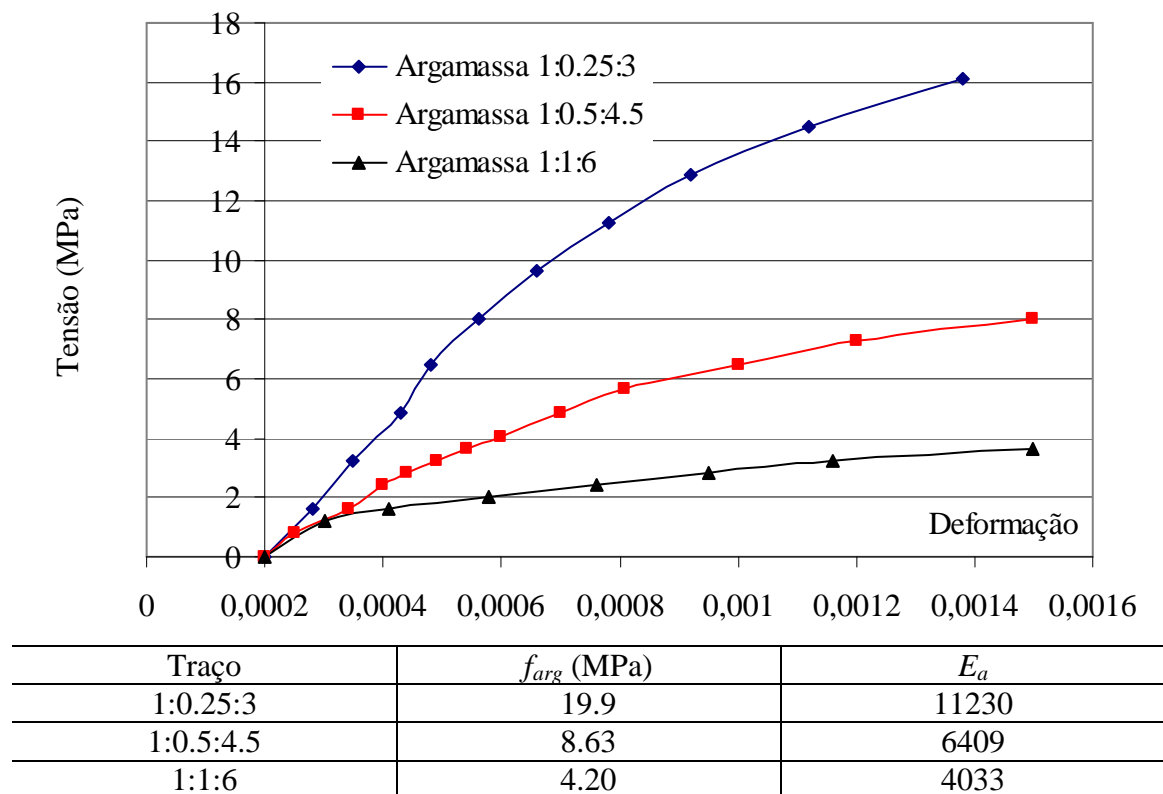


Figura 2- Curva tensão-deformação de argamassas comprimidas uniaxialmente.

A equação (1), apresentada na Figura 3, foi a que melhor representou os estudos experimentais com coeficiente de correlação (R^2) igual 0.99. O coeficiente de correlação (R^2), para uma aproximação linear, fora de 0.84.

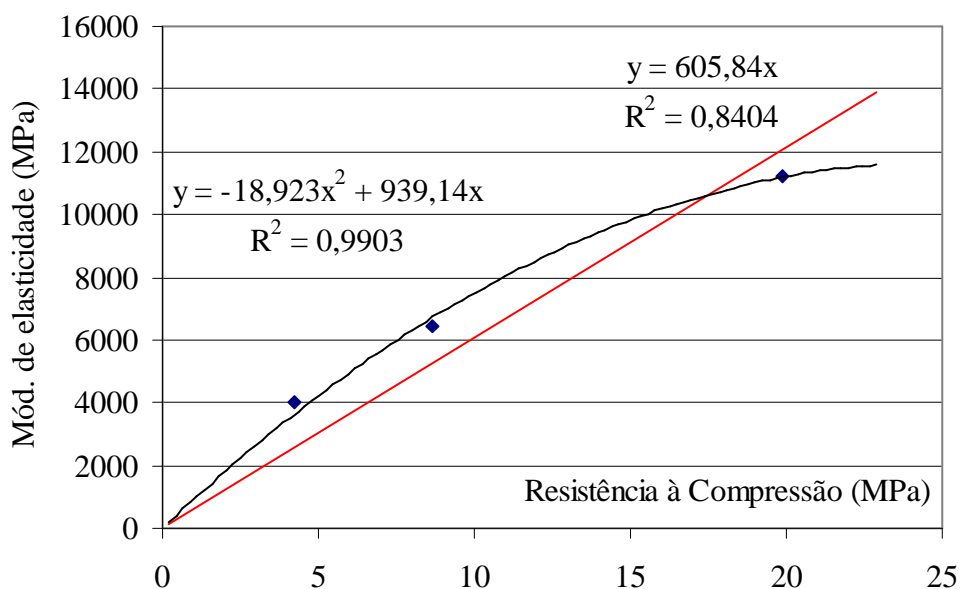


Figura 3- Módulo de elasticidade tangente inicial versus resistência à compressão.

$$E_{arg} = -18.9 f_{arg}^2 + 939.4 f_{arg} \quad (1)$$

3. ENSAIOS DE COMPRESSÃO EM PRISMAS DE BLOCOS DE CONCRETO

3.1. Diagrama tensão-deformação de prismas

A figura 4 apresenta os resultados da curva tensão-deformação dos prismas para o bloco designado por M1, juntamente com a resistência da argamassa, módulo de elasticidade do conjunto bloco e argamassa, módulo de elasticidade da argamassa uniaxial, obtida através da equação (1), e a comparação entre o módulo de elasticidade da argamassa confinada em função do módulo de elasticidade obtido em cilindros. Como hipótese inicial, para se prever o módulo de elasticidade confinado da argamassa presente nos prismas, se supõe que a deformação dos prismas até 30% da tensão última é governada, basicamente, pela deformação da argamassa entre blocos. Os prismas foram construídos com duas resistências de blocos e quatro traços de argamassas. Observa-se que o diagrama tensão-deformação é dependente da resistência à compressão da junta de assentamento. Quanto menor a resistência à compressão da argamassa, maior é as não-linearidades do conjunto. A curva tensão-deformação para o traço de argamassa 1:1:6 e 1:2:9 apresentaram resultados similares nos valores de deformação.

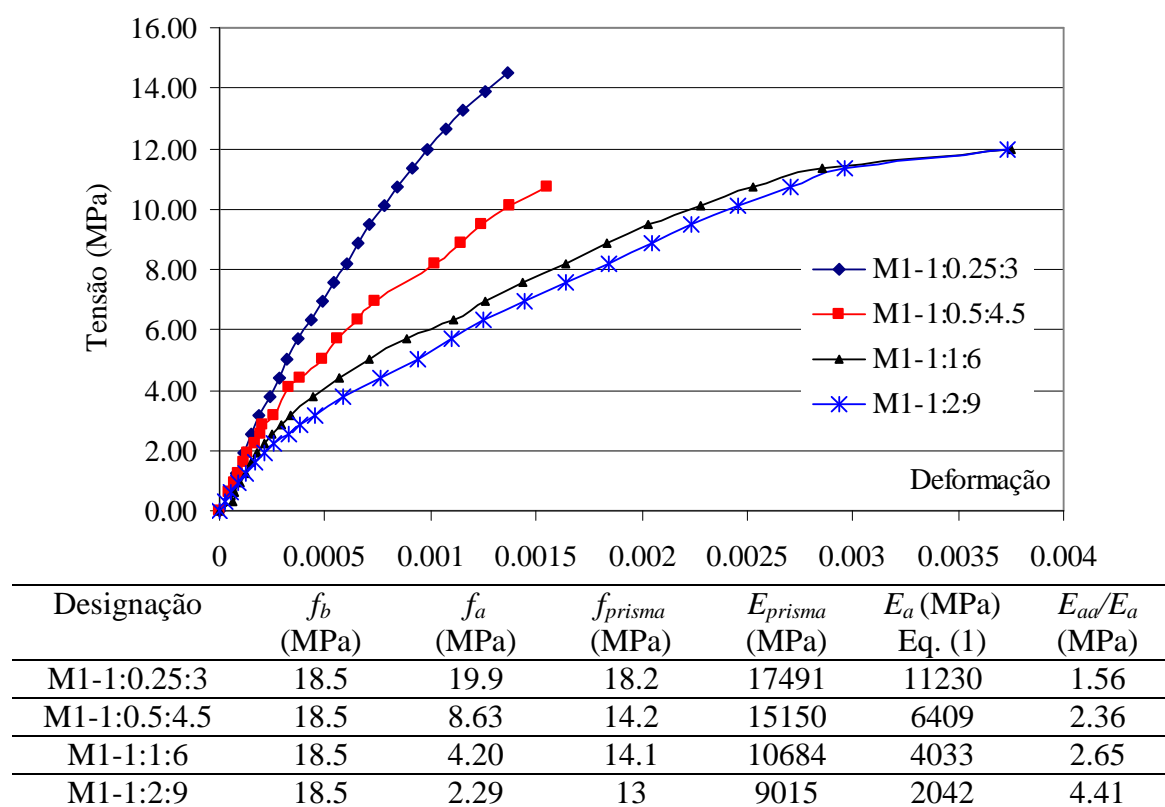


Figura 4- Diagrama tensão-deformação de prismas de blocos de concreto.

A relação entre E_{ac}/E_a para os diferentes traços de argamassa permitem concluir que existe um aumento na rigidez da argamassa em relação ao medido uniaxialmente. Este aumento é maior à medida que se diminuiu a resistência à compressão da junta. Para o bloco designado como M1, os dados apresentados permitem concluir que existe uma diferença na trajetória do diagrama tensão-deformação para os prismas, em função do tipo de argamassa. Existe uma clara diferença nas deformações medidas para os prismas confeccionados com argamassas de traço 1:0.25:3 e 1:0.5:4.5. Os prismas confeccionados com o traço 1:1:6 e 1:2:9 apresentaram comportamentos semelhantes.

A figura 5 apresenta os resultados do diagrama tensão-deformação de prismas com os respectivos resultados individuais para o bloco designado como M2. A resistência à compressão da argamassa foi obtida em cilindros de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura.

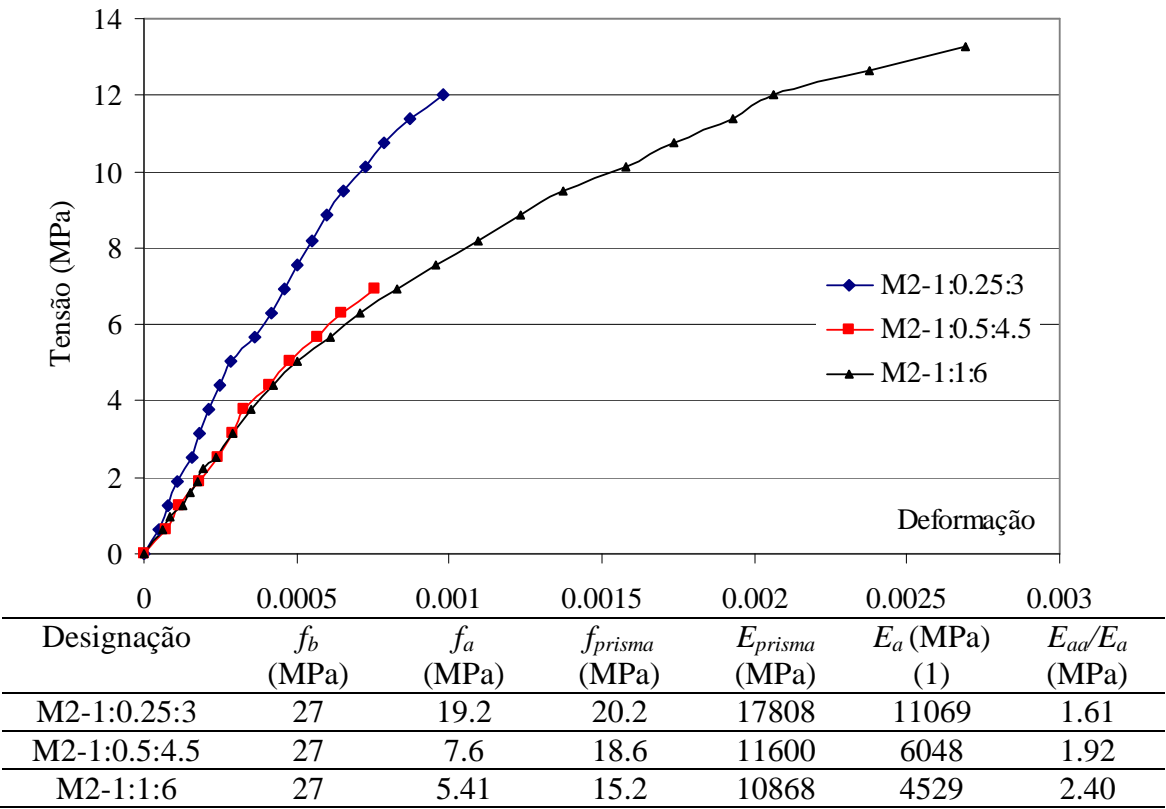


Figura 5- Diagrama tensão-deformação de prismas de blocos de concreto.

A figura 6 apresenta a curva que melhor descreve a proporção entre o módulo de elasticidade confinado e o módulo de elasticidade uniaxial em função da resistência à compressão da argamassa.

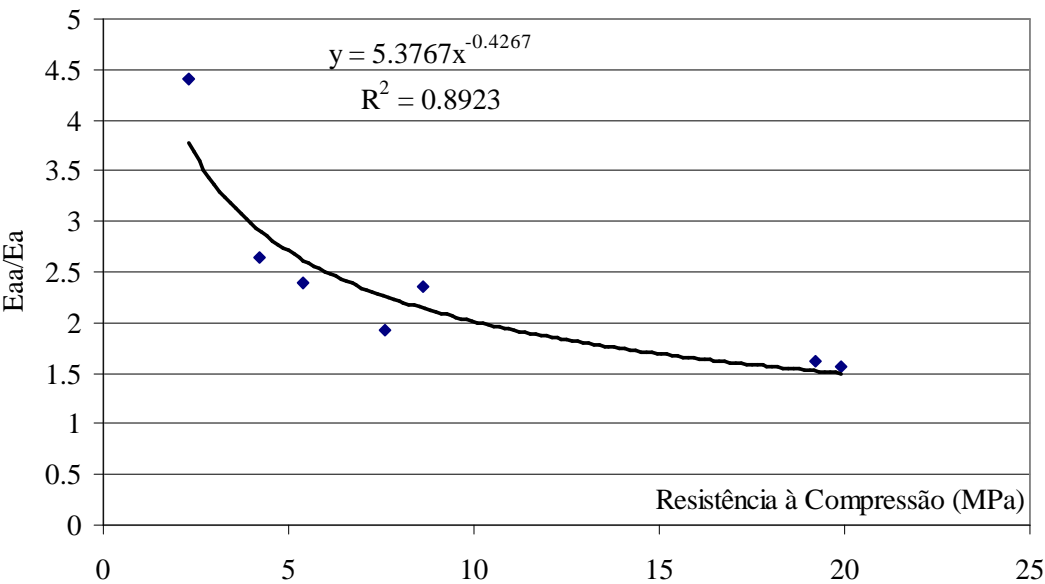


Figura 6 – Relação entre E_{aa}/E_a em função da resistência à compressão da argamassa.

A função que melhor representou os pontos foi uma expressão potencial (Eq. (2)), com coeficiente de correlação (R^2) igual a 0.89.

$$\frac{E_{aa}}{E_a} = 5.38 \cdot f_{arg}^{-0.43} \quad (2)$$

Os resultados experimentais indicam que a análise numérica de alvenarias, no intuito de verificar a perda da capacidade resistente, fica limitada devido à falta de conhecimento de propriedades, tais como: os fenômenos responsáveis pelas deformações não-lineares ou plásticas do conjunto e as mudanças nas características mecânicas devido ao estado de tensão gerado durante o carregamento.

No exemplo da Figura 7 (a) e (b) são mostrados os resultados experimentais da curva tensão-deformação dos prismas, onde se verifica o surgimento das deformações plásticas a partir do ponto 1, através da reta de proporcionalidade entre tensões e deformações. Nota-se na Figura 7 (a) e (b) que, as deformações plásticas são maiores quanto mais fracas forem às argamassas.

Os traços de argamassas, que fazem parte do estudo, possuem um fator água/cimento bastante elevado, para uma consistência (medida na mesa de flow-table) dita como ideal pelo assentador. O alto fator água-cimento conduz a uma maior porosidade da argamassa, quando no estado endurecido, que poderia influenciar acentuando as deformações não-elásticas do conjunto.

Para o gráfico da Figura 7 (a) a proporção entre a deformação última plástica e a deformação elástica (ϵ_p/ϵ_e) é igual a 0.51. A Figura 7 (b) a proporção entre a deformação última plástica e a deformação elástica (ϵ_p/ϵ_e) é igual a 1.22. Portanto, ocorre um aumento significativo na proporção entre deformações plásticas pelas elásticas. Como hipótese dos resultados experimentais, poderia se sugerir que as mudanças nas propriedades internas tais como, diminuição da coesão do material e dos tamanhos de poros internos causados pelo carregamento vertical influencia no comportamento plástico do material. Por consequência disto, surge um rearranjo nas partículas do material. Esta sugestão de perda de coesão das ligações ou mudanças na configuração estável dos grãos de agregados da argamassa deve ser estudada a partir de uma análise micro do material antes e pós-ruptura.

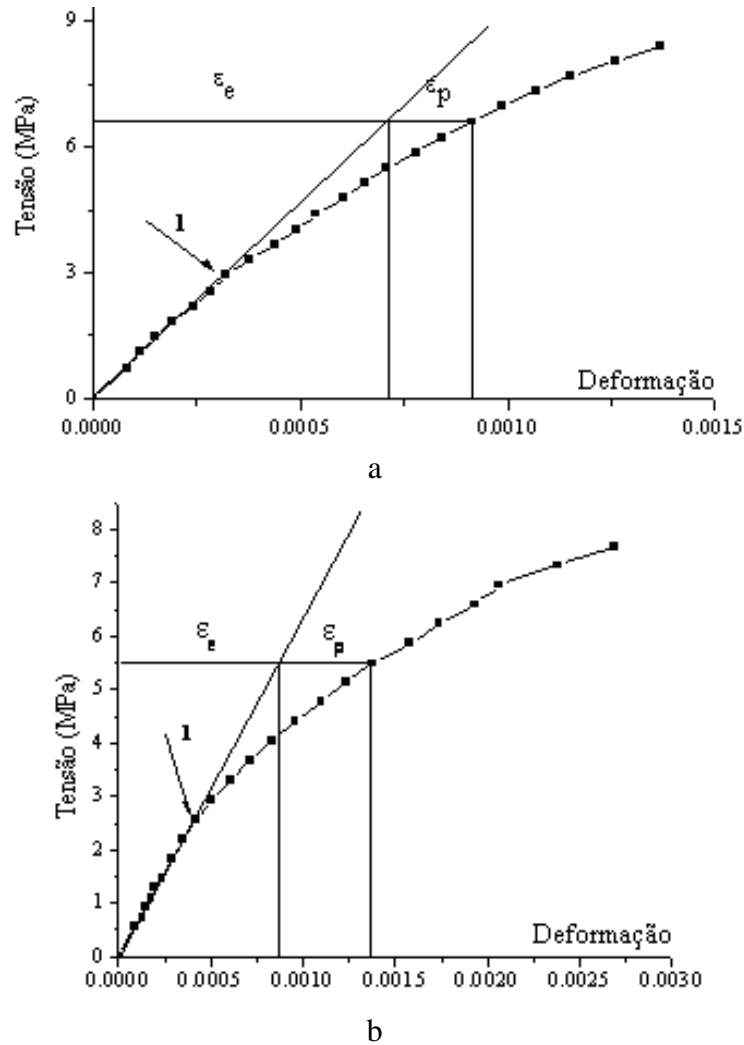


Figura 7- (a) Curva tensão-deformação de prismas construídos com bloco de resistência $f_b = 18.2$ MPa e argamassas de $f_{arg.} = 19.9$ MPa; (b) Curva tensão-deformação de prismas construídos com bloco de resistência $f_b = 27$ MPa e argamassa $f_{arg.} = 5.41$ MPa.

Os estudos experimentais estabelecidos permitiram determinar uma forma para a curva tensão/resistência (σ/f_c) - deformação/deform.última (ϵ/ϵ_u) dos prismas. O diagrama que melhor corresponde aos pontos é uma função polinomial de segundo grau com coeficientes de correlação (R^2) da ordem de 0.99. A Figura 8 (a) apresenta a curva tensão/resistência versus deformação/deformação última dos prismas construídos com bloco de resistência à compressão (f_b) igual a 18.2 MPa e resistência de argamassa ($f_{arg.}$) igual a 19 MPa. A Figura 8 (b) apresenta a curva tensão/resistência versus deformação/deformação última dos prismas construídos com bloco de resistência à compressão (f_b) igual a 27 MPa e resistência da argamassa ($f_{arg.}$) igual a 5.41 MPa. A equação generalizada do diagrama tensão-deformação transformado tem a forma apresentada na Figura 8, cuja aproximação é representada por uma função parabólica conforme mostra a equação 3.

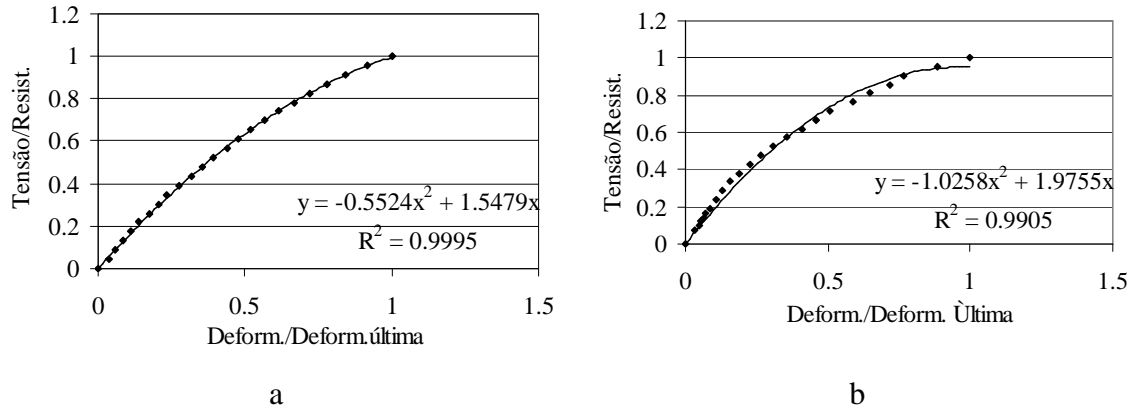


Figura 8. Curva tensão-deformação transformada de prismas de blocos de concreto.

$$\frac{\sigma}{f_c} = a \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_u} - b \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_u} \right)^2 \quad (3)$$

Onde, a constante a e b são obtidas através de diferentes composições entre a resistência de bloco e argamassa.

A tabela 1 apresenta os resultados experimentais das diferentes combinações entre resistência de bloco e argamassa, através da construção de prismas de três blocos.

Tabela 1. Resultados experimentais de prismas de três blocos à compressão.

Prisma	f_b (MPa)	f_{arg} (MPa)	f_{prisma} (MPa)	ε_u	Tensão última de leitura (MPa)	β
1	18.2	19.9	18.2	0.00137	14.5	80%
2	18.2	8.63	14.9	0.00156	10.7	72%
3	18.2	4.2	14.1	0.00230	11.4	81%
4	18.2	2.29	13.0	0.00374	12.0	92%
5	27	19.2	20.2	0.000978	12.0	59%
6	27	7.6	18.7	0.000754	6.95	37%
7	27	5.41	15.3	0.00269	13.3	87%

Os resultados de f_{prisma} e f_b foram determinados na área líquida; β é a proporção entre o início de ruptura e a resistência última. A Figura 9 apresenta as curvas tensão-deformação axial e lateral obtida nos ensaios de compressão em prismas para a combinação 1 e 7 da Tabela 1. A capacidade de deformação axial máxima é distinta nas duas combinações analisadas para o caso (a) $\varepsilon_{axial} = 0.00137$ e para o caso (b) $\varepsilon_{axial} = 0.0027$. As deformações laterais máximas foram semelhantes para o caso (a) $\varepsilon_{lateral} = 0.00059$ e para o caso (b) $\varepsilon_{lateral} = 0.00063$.

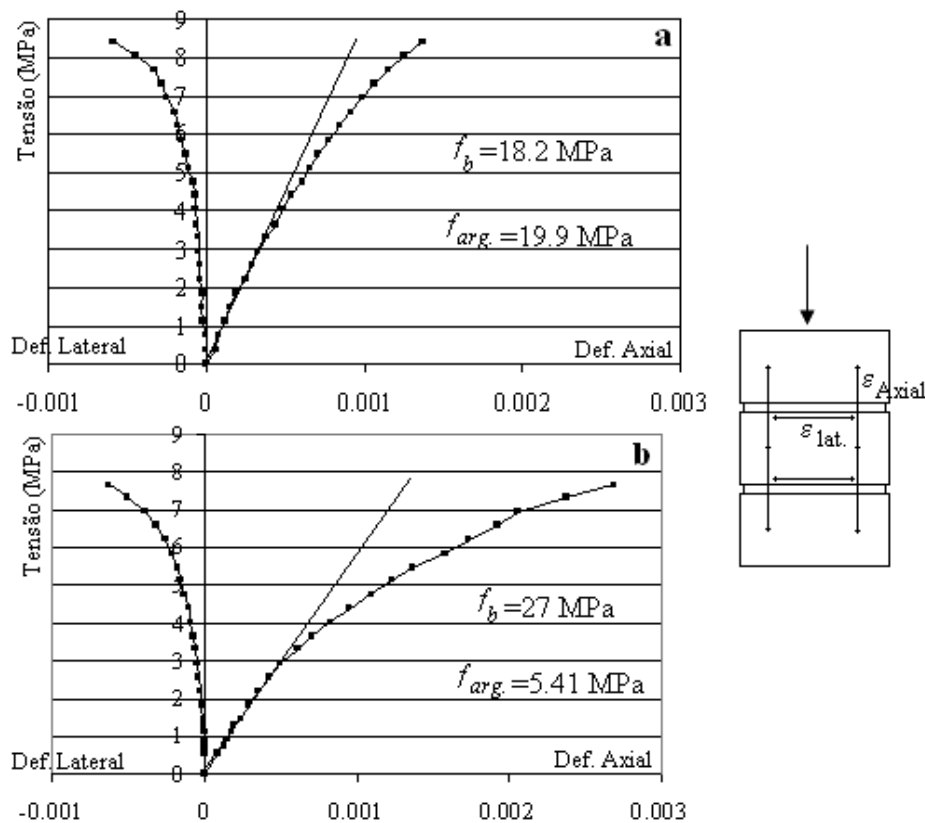


Figura 9. Curva tensão-deformação axial e lateral dos prismas de concreto.

Através dos resultados experimentais se determinou a relação tensão/resistência à compressão versus o Poisson do conjunto ponto a ponto, onde a deformação lateral foi obtida no bloco, como mostra a Figura 9. Nos prismas construídos com traço de argamassa 1:0.25:3, até a proporção tensão/resistência igual à 0.2, houve uma grande variação no valor do coeficiente de Poisson. A partir disto, nota-se que o valor do Poisson se estabelece no patamar de 0.15, quando atinge a proporção entre tensão/resistência igual 0.6. Acima disto, acontece um aumento gradativo do Poisson até atingir à ruptura com valor de 0.45. Nos prismas construídos com traços de argamassa 1:1:6, nota-se um aumento gradativo do coeficiente de Poisson, desde as tensões iniciais até próximo às tensões finais, cujo valor fica próximo de 0.25. Se for tomada a proporção entre tensão/ resistência de 0.4 a 0.6 o coeficiente de Poisson médio medido foi de 0.10. A Figura 10 mostra os resultados experimentais.

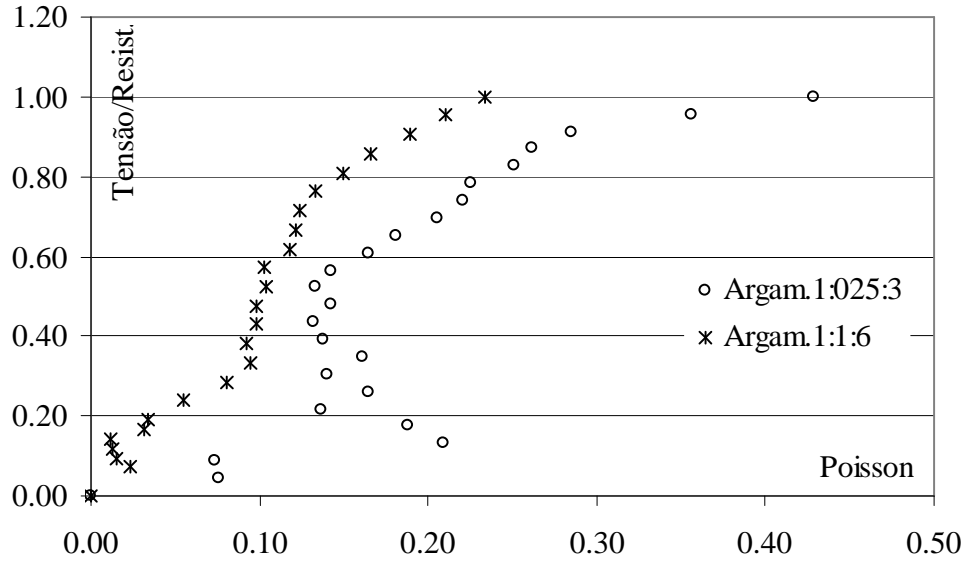


Figura 10. Relação entre a proporção tensão/resistência versus o Poisson do prisma.

A superfície que melhor descreve a relação entre a f_{bloco} , $f_{arg.}$, f_{prisma} é apresentada na figura 11 (Eq. (4)).

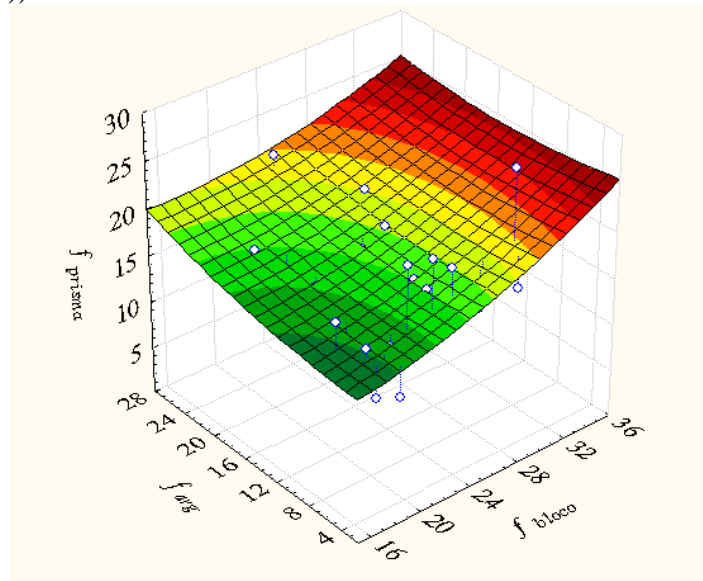


Figura 11- Relação entre a f_{prisma} , $f_{arg.}$ e f_{bloco} .

$$f_{prisma} = 14.48 - 0.148.f_b + 0.129.f_{arg} + 0.0129.f_b^2 - 0.0092.f_b.f_a + 0.0064.f_a^2 \quad (4)$$

4. MODELO PARA PREVISÃO DO MODO DE RUPTURA

Pretende-se, neste trabalho, apresentar um modelo teórico que descreva o comportamento mecânico na ruptura dos prismas de bloco de concreto, através do esmagamento da junta de assentamento ou da tensão de tração induzida no bloco. Como premissa inicial, o modelo estabelece uma relação entre a resistência à compressão do conjunto em função dos limites de resistência da argamassa à compressão e do bloco à

tração. Para tanto, pela dificuldade em realizar os ensaios de tração direta, usou-se os dados dos estudos de Mohamad [4] e Romagna [5], onde os autores utilizaram ensaios de tração indireta por compressão, devido a dois fatores: pequena variabilidade dos resultados e dificuldade em se manter a seção das amostras constantes em função do formato tronco-cônico do bloco. A figura 12 mostra os resultados de tração indireta em função da resistência à compressão do bloco.

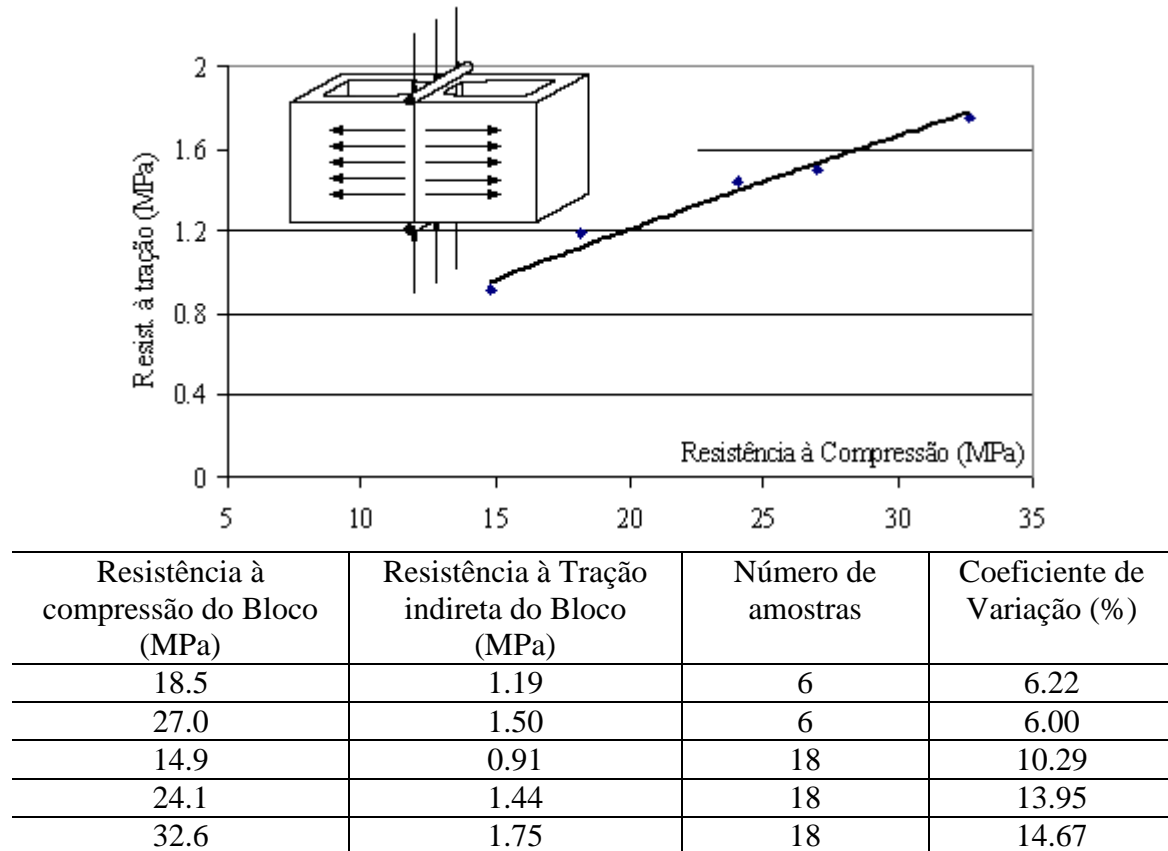


Figura 12- Relação entre a resistência à tração por compressão em função da resistência à compressão do bloco.

A equação 5 descreve uma função potencial entre a resistência à tração e a compressão de blocos de concreto.

$$f_t = 0.1137 \cdot f_c^{0.789} \quad (5)$$

Tabela 2 - Resultados experimentais de Hamid e Drysdale [2], Khalaf et. al. [3], Mohamad [4], Romagna [5], Cheema e Klingner [6], Calçada [7].

	f_{bloco} (MPa)	f_{arg} (MPa)	f_{prisma} (MPa)	f_t (MPa)	f_{prisma}/f_{arg}	f_{prisma}/f_t
Mohamad [4]	18.50	19.90	18.25	1.14	0.91	16.01
	18.50	8.63	14.86	1.14	1.64	13.03
	18.50	4.20	14.11	1.14	3.35	12.37
	18.50	2.29	13.00	1.14	5.68	11.40
	27.00	19.20	20.21	1.53	1.05	13.20
	27.00	7.60	18.66	1.53	2.45	12.20
	27.00	5.41	15.27	1.53	2.81	9.98
Romagna [5]	17.70	3.90	12.50	1.10	3.20	11.36
	27.40	5.60	15.70	1.55	2.80	10.13
	29.00	3.80	17.10	1.62	4.50	10.56
	24.10	7.40	17.90	1.40	2.42	12.78
	33.50	7.80	22.00	1.81	2.82	12.15
Hamid e Drysdale [2]	20.00	5.70	15.40	1.21	2.70	12.73
	20.00	14.70	16.40	1.21	1.11	13.55
	20.00	18.20	16.30	1.21	0.89	13.47
Cheema e Klingner [6]	25.80	14.90	19.25	1.48	1.29	13.01
Khalaf et. al. [3]	24.3	9.20	17.80	1.41	1.93	12.62
	24.3	15.40	17.40	1.41	1.13	12.34
	24.3	26.50	21.40	1.41	0.81	15.18
Calçada [7]	17.80	5.20	16.80	1.10	3.23	15.27
	24.60	5.20	21.00	1.42	4.04	14.79
	29.70	5.20	28.40	1.65	5.46	17.21
	12.60	5.20	16.30	0.84	3.13	19.40
	21.00	5.20	23.40	1.26	4.50	18.57
	23.00	5.20	22.90	1.35	4.40	16.96

f_{prisma} e f_{bloco} foram obtidas na área líquida; f_t é a resistência à tração do bloco estimado, através da equação (5); f_{arg} é a resistência da argamassa obtida através de cilindros de 5 cm por 10 cm de altura.

Os resultados experimentais, apresentados na figura 13, possibilitaram traçar o gráfico entre f_{prisma}/f_{arg} e f_{prisma}/f_t em função da proporção de rigidez entre argamassa e bloco. A intersecção entre as duas curvas é o ponto que estabelece uma mudança no modo de ruptura do conjunto. O modo de ruptura 1 é caracterizado por uma ruptura gerada pela indução de tração no bloco, o modo de ruptura 2 é caracterizado pelo esmagamento da junta de assentamento e a posterior indução de tração no bloco.

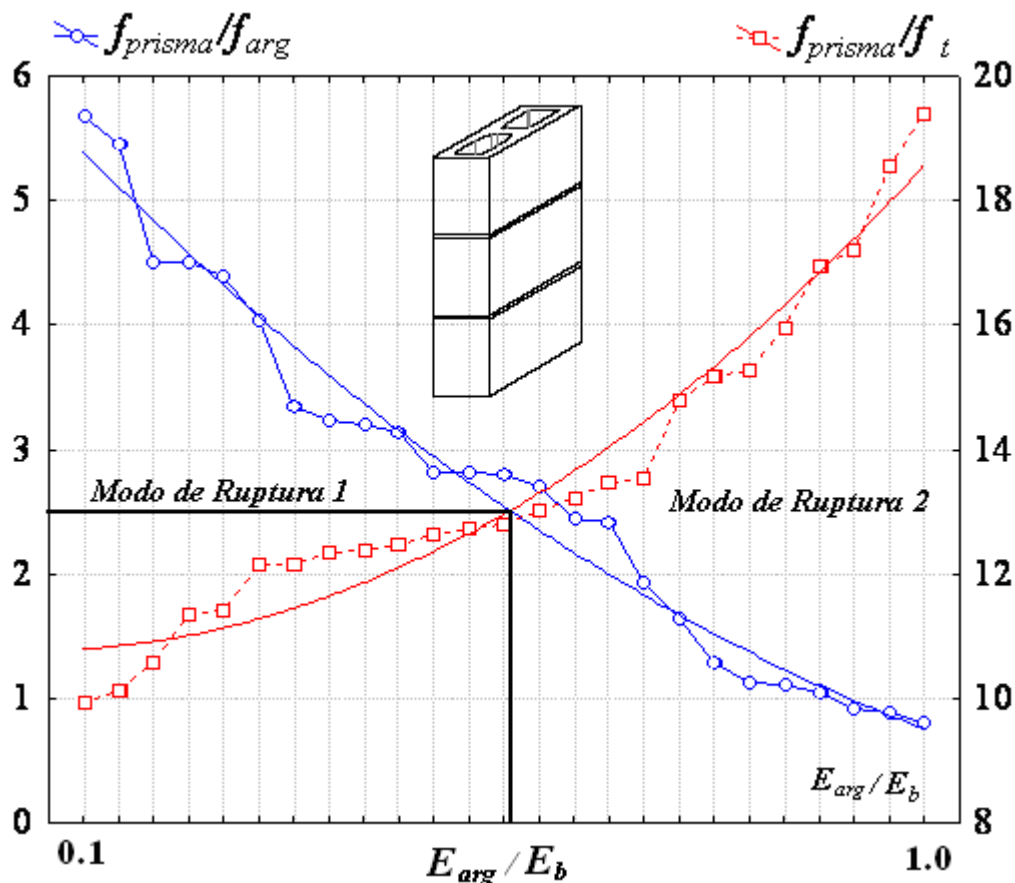


Figura 13 – Relação entre f_{prisma}/f_{arg} , f_{prisma}/f_t e E_{arg}/E_b .

5 - CONCLUSÃO

As principais conclusões deste trabalho são:

- O aumento da rigidez confinada da argamassa de assentamento verificado nos ensaios de prismas permitem concluir que existe uma tendência de equilíbrio entre as proporções de forças absorvidas pelo bloco e pela argamassa de assentamento. Portanto, quanto mais fraca for a argamassa maior será a relação entre E_{aa}/E_a . Isto poderia justificar a pouca diferença no aumento de resistência do prisma em função do incremento de resistência da argamassa.
- O ensaio de tração indireta por compressão forneceu resultados com boa precisão e baixa variabilidade. Este tipo de ensaio é de fácil obtenção, sem a necessidade de equipamentos especiais.
- As deformações não-lineares são significativamente maiores em função do traço de argamassa. Pode-se sugerir que este aumento seria acarretado pela diminuição da coesão do material durante a aplicação da tensão vertical ao conjunto.
- Nota-se que o Poisson dos prismas medido no bloco aumenta significativamente, após a relação entre a tensão atuante e resistência última atingir o nível de 0.6.

- Pode se salientar a existência de dois modos de ruptura do conjunto, o primeiro é caracterizado pela ruptura a tração do bloco quando a tensão de tração do bloco atingir o limite de resistência à tração do material, e o segundo pelo esmagamento da junta de assentamento quando a resistência à compressão confinada da argamassa for atingida.
- Estudos devem ser dirigidos para o entendimento de quais fenômenos são responsáveis pelo surgimento das deformações plásticas enfatizando a natureza física da base porosa e da quantidade de material aglomerante.

6 – REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] NBR 10837 – Cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto- Rio de Janeiro, ABNT, Nov. 1989.
- [2] Hamid, A. A. and Drysdale R. G. “Suggested failure criteria for grouted concrete masonry under axial compression”. American Concrete Institute- Journal Proceedings. Out. 1979; Vol. 76(nº 10):1047-1062.
- [3] Khalaf, F. M.; Hendry, A. W. and Fairbairn, D. R. “ Study of the compressive strength of blockwork masonry”- American Concrete Institute- Structural Journal. July-August.1994;Vol.91(nº 4):367-375.
- [4] Mohamad, G. “Comportamento mecânico na ruptura de prismas de blocos de Concreto”-Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-UFSC, Florianópolis. 1998-178p.
- [5] Romagna, R. H. - “Resistência à compressão de prismas de blocos de concreto grauteados e não grauteados”-Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-UFSC, Florianópolis. 2000-218p.
- [6] Cheema, T. S. and Klingner R. E. “Compressive Strength of Concrete Masonry Prism”. American Concrete Institute- ACI Structural Journal . 1986 Jan; Vol. 83(nº 1):88-97.
- [7] Calçada, L. M. L. “Avaliação do comportamento de prismas grauteados e não grauteados de blocos de concreto”-Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-UFSC, Florianópolis. 1998-188p.